

Выводы

1. Проведенный анализ структур построения современных СЭП ТПА переменного тока установлено, что в настоящее время для выполнения геологических, научно-исследовательских и спасательных работ на предельных глубинах с длиной кабель-троса до 8000 м, а также передачи энергии мощностью свыше 10 кВт на токоприемники подводного аппарата, необходимо использовать СЭП ТПА с передачей энергии по кабель-тросу переменным напряжением повышенной частоты (рис. 5).

2. Реализованная на макетном образце структурная схема СЭП ТПА с передачей энергии по кабель-тросу переменным напряжением повышенной частоты (рис. 5), обеспечивает стабилизацию напряжения на нагрузках ТПА и отвечает основным требованиям, предъявляемым к СЭП ТПА по величине передаваемой мощности при высоких массогабаритных показателях.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение №14.B37.21.0162.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подводные аппараты для геологических исследований / под ред. А.М. Игнатова. — Геленджик: ПО «Южморгеология», 1990. — 92 с.
2. Ястребов В.С. Телеуправляемые подводные аппараты. — Л.: Судостроение, 1985. — 232 с.

3. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — № 5. — Т. 307. — С. 120–123.

Поступила 06.03.2013 г.

УДК 62-83-52

**ДИНАМИКА ИНВАРИАНТНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА
НА ОСНОВЕ АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА**

И.В. Дорощенко, В.С. Захаренко

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого
E-mail: doroschenko.igor@gmail.com

С использованием функциональных, структурных схем и имитационной модели нагрузочной части испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада произведен синтез системы управления и расчет переходных процессов. Определены показатели качества переходных процессов.

Ключевые слова:

Асинхронно-вентильный каскад, испытательный стенд, структурная схема, инвариантность по моменту, динамика, синтез регуляторов.

Key words:

Asynchronously-thyristor cascade, test bench, block diagram, torque invariance, dynamics, synthesis of regulators.

В последнее время наблюдается рост мировых цен на энергоресурсы, поэтому одним из приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира является энергосбережение [1], в том числе и при проведении испытаний двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В связи с этим современные испытательные стенды должны удовлетворять требованиям регламента испытаний, управляемости и энергосбережения. Как известно, эффективность энергосберегающих технологий в значительной мере определяется эффективностью электропривода, входящего в состав стенда. Таким образом, разработка высокопроизводительных, компактных и экономичных систем привода является приоритетным направлением развития современных испытательных стендов. Испытательный стенд представляет собой конструктивное единство электромеханического преобразо-

вателя энергии, силового преобразователя и устройства управления. С целью проведения достаточно точных и качественных испытаний необходимо обеспечить инвариантность нагрузочного момента в широком диапазоне изменения скорости вращения.

Инвариантность нагрузочной части стенда для генераторного режима асинхронно-вентильного каскада (АВК) обеспечивается [2] при использовании положительной обратной связи по моменту и отрицательной по скорости, поскольку увеличение нагрузочного момента производится при уменьшении напряжения управления инвертора. Функциональная схема нагрузочной части стенда показана на рис. 1.

Целью исследования является анализ динамических режимов инвариантного испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада.

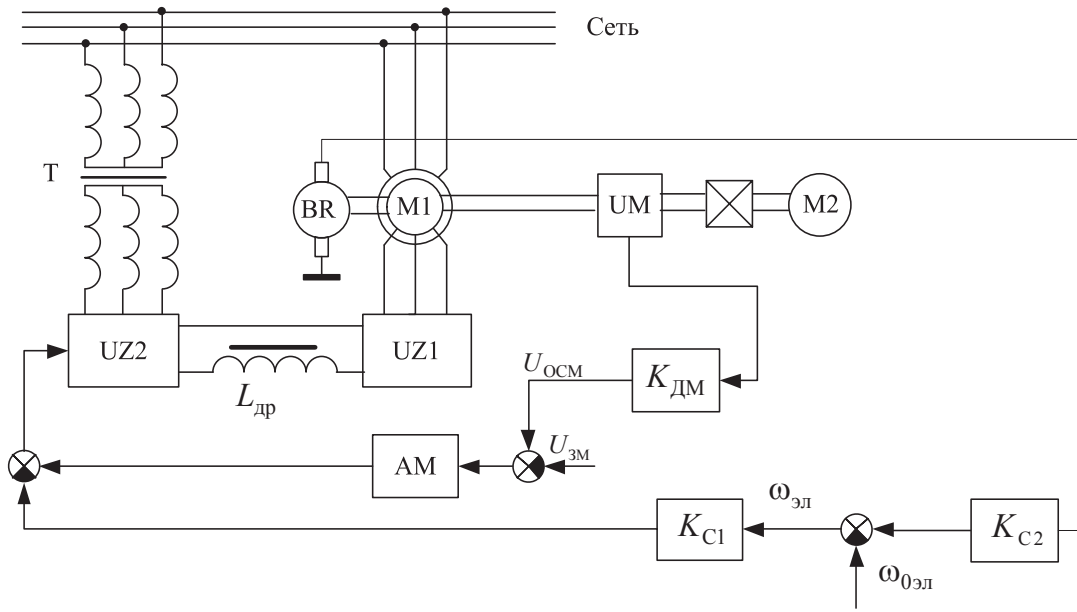


Рис. 1. Функциональная схема нагрузочной части стенда на основе АВК с рекуперацией энергии в сеть: М1 – асинхронный двигатель с фазным ротором; М2 – испытуемый двигатель; $L_{др}$ – дроссель; UZ1 – трехфазный мостовой выпрямитель; UZ2 – трехфазный мостовой управляемый инвертор ведомый сетью; UM – датчик момента с коэффициентом передачи K_{DM} ; BR – датчик скорости вращения; AM – регулятор момента с коэффициентом передачи K_{PM} ; K_{C1} , K_{C2} – коэффициенты передачи суммирующих усилителей по каналам обратных связей

Используя известную математическую модель обобщенной электрической машины в осях x и y , вращающуюся с синхронной скоростью [3, 4], и функциональную схему нагрузочной части инвариантного стенда на основе АВК (рис. 1), была получена структурная схема нагрузочной части, представленная на рис. 2.

На схеме:

$$W_1(p) = \frac{T_{2\Sigma}(T_{2\Sigma}p + 1)}{(1 + (T_{2\Sigma}\omega_{0эл}S_{нач})^2)(T_1^2p^2 + 2\xi_1T_1p + 1)};$$

$$W_2(p) = \frac{(\Psi_{2y} - T_{2\Sigma}\omega_{0эл}S_{нач}\Psi_{2x})(T_2p + 1)}{(T_{2\Sigma}p + 1)};$$

$U'_{1м}$ – амплитуда напряжения статора, приведенного к цепи ротора; $\omega_{0эл}$ – угловая синхронная скорость каскада; $k_{сх}$ – схемный коэффициент инвертора; p_d – число пар полюсов двигателя; $T_{и}$ – постоянная времени инвертора в роторной цепи; $K_{и}$ – коэффициент передачи инвертора в роторной це-

пи; $K_1 = \frac{L_{12}}{L_1}$ – коэффициент магнитной связи ста-

тора; $L'_{\sigma\Sigma} = \frac{L_1L_{2\Sigma} - L_{12}^2}{L_1}$ – эквивалентная индуктив-

ность рассеяния статора; L_1 – индуктивность рассеяния обмотки статора; $L_{2\Sigma} = L_2 + L_{др} + L_{и}$ – суммарная индуктивность цепи ротора, включающая индуктивность L_2 обмотки ротора, индуктивность $L_{др}$ дросселя, индуктивность $L_{и}$ силовой цепи управляемого инвертора, ведомого сетью; L_{12} – взаим-

ная индуктивность; $T_{2\Sigma} = \frac{L'_{\sigma\Sigma}}{R_{2\Sigma}}$ – эквивалентная

суммарная постоянная времени ротора; $R_{2\Sigma} = R_2 + R_{др} + R_{и}$ – суммарное активное сопротивление роторной цепи, включающее активное сопротивление роторной цепи R_2 , активное сопротивление дросселя $R_{др}$, активное сопротивление силовой

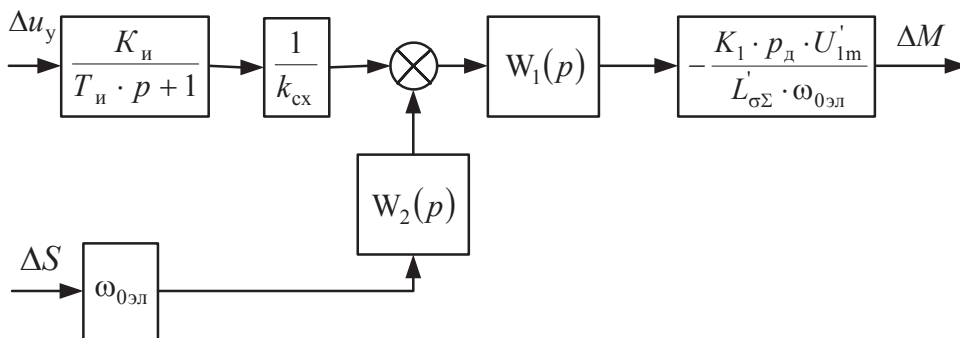


Рис. 2. Структурная схема нагрузочной части стенда на основе АВК

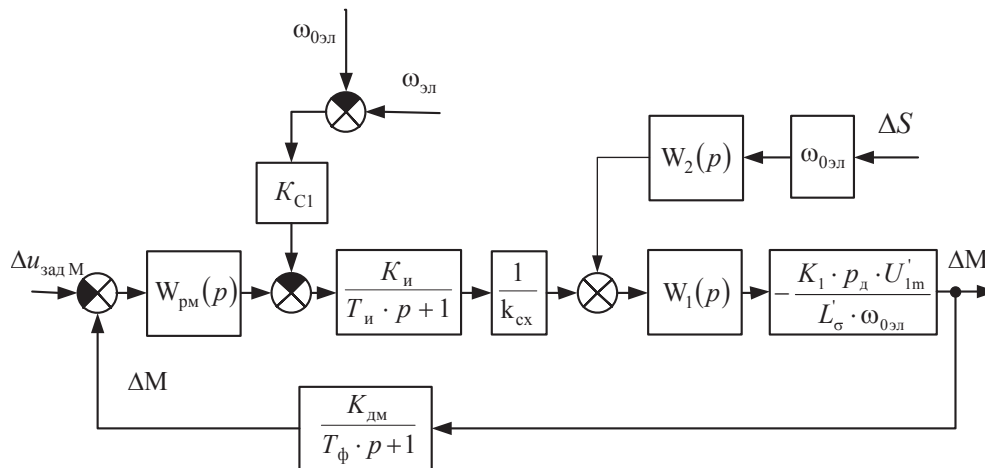


Рис. 3. Структурная схема АВК при инвариантности момента

цепи управляемого инвертора, ведомого сетью R_n ;

$$T_1 = \frac{T_{2\varnothing\Sigma}}{\sqrt{1 + (T_{2\varnothing\Sigma} \omega_{0эл} S_{нач})^2}} - \text{постоянная времени};$$

$$\xi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (T_{2\varnothing\Sigma} \omega_{0эл} S_{нач})^2}} - \text{коэффициент затухания};$$

$S_{нач}$ – начальное значение скольжения асинхронно-вентильного каскада в рабочей точке;

$$T_2 = \frac{T_{2\varnothing\Sigma} \Psi_{2y}}{\Psi_{2y} - T_{2\varnothing\Sigma} \omega_{0эл} S_{нач} \Psi_{2x}} - \text{постоянная времени};$$

$\Psi'_{1x}, \Psi'_{1y}, \Psi'_{2x}, \Psi'_{2y}$ – потокосцепления статора и ротора.

Используя функциональную схему нагрузочной части (рис. 1) и структурную схему нагрузочной части (рис. 2), с учетом связей для компенсации возмущений по скорости, получим структурную схему АВК, представленную на рис. 3.

На основании структурной схемы (рис. 3) получим структурную схему контура регулирования момента, представленную на рис. 4. Поскольку передаточная функция объекта регулирования $W_1(p)$ неудобна для анализа в общем случае, то метод синтеза регулятора (метод логарифмических частотных характеристик или метод последовательной оптимизации контуров) целесообразно выбирать для конкретных параметров силовой части стенда. Для АВК на основе асинхронного двигателя с фазным ротором марки МТФ 112-6 был произведен расчет параметров и синтез регулятора момента.

Как известно, скольжение идеального холостого хода асинхронно-вентильного каскада определяется для конкретного значения ЭДС инвертора [3–5]. В связи с этим при численных расчетах необходимо учитывать изменение синхронной скорости каскада $\omega_{0эл}$. Для выбранного рабочего режима $\omega_{0эл} = 546$ рад/с.

Из структурной схемы контура регулирования момента (рис. 4) получим передаточную функцию объекта регулирования:

$$W_{OP}(p) = -\frac{K_n \frac{1}{k_{сх}} \frac{p_d K_1 U'_{1м}}{L'_{\sigma\Sigma} \omega_{0эл}} T_{2\varnothing\Sigma} (T_{2\varnothing\Sigma} p + 1)}{T_n p + 1 \left((1 + (T_{2\varnothing\Sigma} \omega_{0эл} S_{нач})^2) \times \right. \\ \left. \times (T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1) \right)},$$

где

$$T_1 = \frac{T_{2\varnothing\Sigma}}{\sqrt{1 + (T_{2\varnothing\Sigma} \omega_{0эл} S_{нач})^2}} = \\ = \frac{0,00675}{\sqrt{1 + (0,00675 \cdot 546 \cdot 0,07)^2}} = 6,53 \text{ мс}; \\ \xi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (T_{2\varnothing\Sigma} \omega_{0эл} S_{нач})^2}} = \\ = \frac{1}{\sqrt{1 + (0,00675 \cdot 546 \cdot 0,07)^2}} = 0,968.$$

В числовых значениях передаточная функция примет вид:

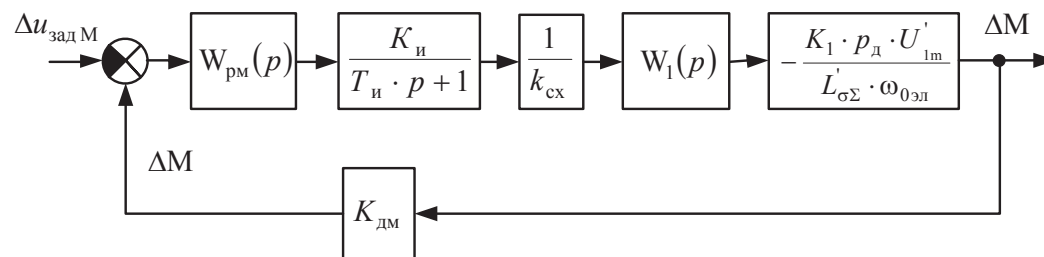


Рис. 4. Структурная схема контура регулирования момента

$$W_{\text{оп}}(p) = - \frac{9,7 \cdot (6,75 \cdot 10^{-3} p + 1)}{\left((3,33 \cdot 10^{-3} p + 1) \times \left(0,00653^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,968 \cdot 0,00653 \cdot p + 1 \right) \right)}$$

Так как $\xi_1 > 0,35$, апериодическое звено второго порядка допустимо заменить двумя апериодическими звеньями первого порядка с постоянной времени T_1 [6]. С учетом данного допущения передаточная функция примет вид:

$$W_{\text{оп}}(p) = - \frac{9,7(6,75 \cdot 10^{-3} p + 1)}{\left((3,33 \cdot 10^{-3} p + 1) \times (6,53 \cdot 10^{-3} p + 1)(6,53 \cdot 10^{-3} p + 1) \right)}$$

В данном случае постоянная времени форсирующего звена очень близка к постоянной времени апериодических звеньев, поэтому выражение можно упростить за счет сокращения двух звеньев.

$$W_{\text{оп}}(p) \approx - \frac{9,7}{(3,33 \cdot 10^{-3} p + 1)(6,53 \cdot 10^{-3} p + 1)}$$

В рассматриваемом случае передаточная функция объекта регулирования получилась достаточно простой, поэтому нет необходимости применять частотный метод синтеза. Синтезируем регулятор момента на технический оптимум. Тогда необходим ПИ регулятор момента со следующей передаточной функцией:

$$W_{\text{рм}}(p) = K_{\text{рм}} \frac{T_{\text{рм}} p + 1}{p}$$

Постоянная времени регулятора момента: $T_{\text{рм}} = T_1 = 6,53$ мс.

Коэффициент передачи регулятора момента:

$$K_{\text{рм}} = \frac{k_{\text{сх}} L'_{\sigma \Sigma} \omega_{0 \Sigma} (1 + (T_{2 \Sigma} \omega_{0 \Sigma} S_{\text{нач}})^2)}{K_{\text{и}} p_{\text{д}} K_1 U_{1 \text{м}} T_{2 \Sigma} 2 T_{\text{и}}} = \frac{2,34 \cdot 0,012 \cdot 546 (1 + (0,00675 \cdot 546 \cdot 0,07)^2)}{27,83 \cdot 3 \cdot 0,925 \cdot 311 \cdot 0,00675 \cdot 2 \cdot 0,00333} = 15,2.$$

На основании системы уравнений имитационной модели стенда [7], с учетом компенсационных связей и синтезированного регулятора момента, производился расчет следующих переходных процессов:

- 1) (по управлению) пуск – выход на заданную частоту вращения (570 рад/с), подача номинального значения сигнала задания момента $U_{\text{зм}} = -6\text{В}$;
- 2) (по возмущению) повышение скорости в пределах рабочей области, при неизменном сигнале задания момента $U_{\text{зм}} = -6\text{В}$;
- 3) (по возмущению) понижение скорости в пределах рабочей области, при неизменном сигнале задания момента $U_{\text{зм}} = -6\text{В}$;
- 4) (по управлению) понижение сигнала задания момента $U_{\text{зм}} = -3\text{В}$, при неизменной скорости вращения.

Диаграммы рассчитанных процессов для генераторного режима АВК представлены на рис. 5–8, где 1 – угловая скорость вращения; 2 – мгновенное значение момента; 3 – значение момента с усреднением за полупериод субгармонических колебаний.

В результате анализа переходных процессов установлено:

- 1) при повышении скорости в пределах рабочей области (рис. 6) перерегулирование практически отсутствует, время регулирования $t_{\text{пн}} \approx 0,021$ с;

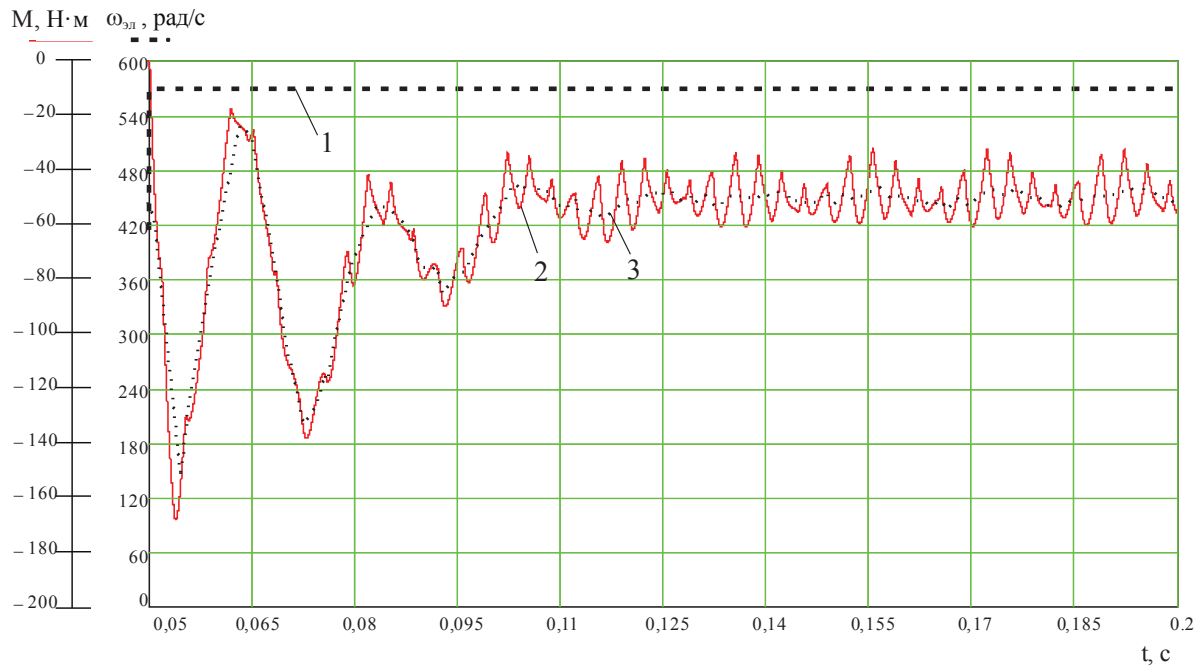


Рис. 5. Переходные процессы АВК при номинальном значении сигнала задания момента



Рис. 6. Переходные процессы АВК при повышении скорости в пределах рабочей области и неизменном сигнале задания момента

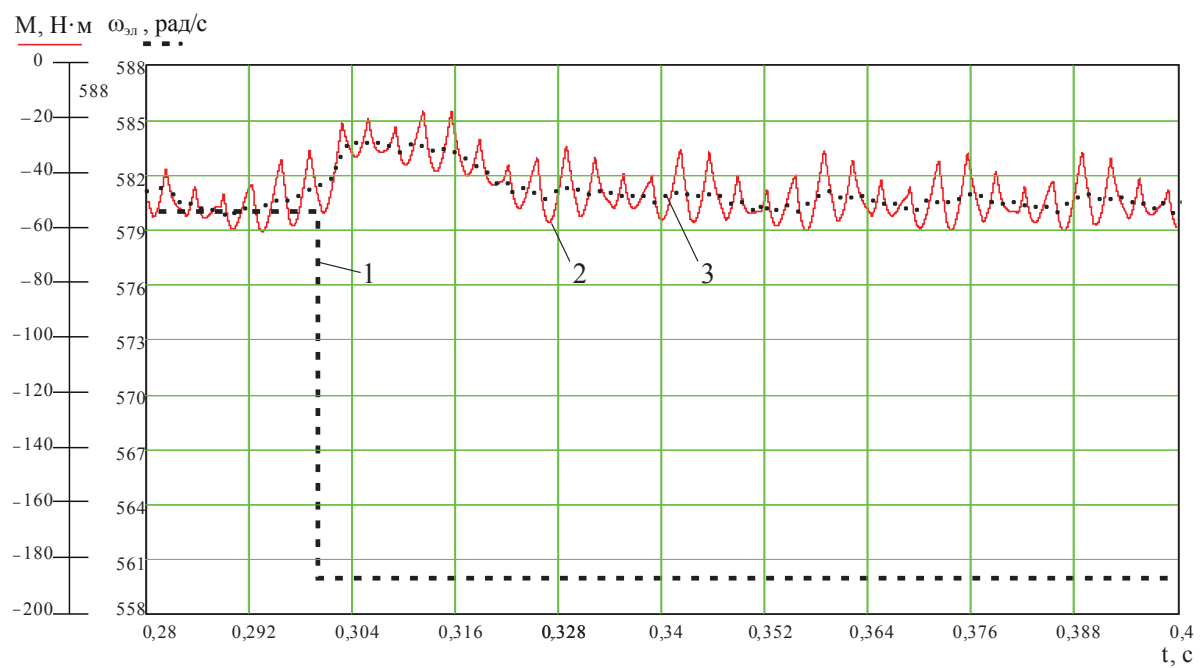


Рис. 7. Переходные процессы АВК при понижении скорости в пределах рабочей области и неизменном сигнале задания момента

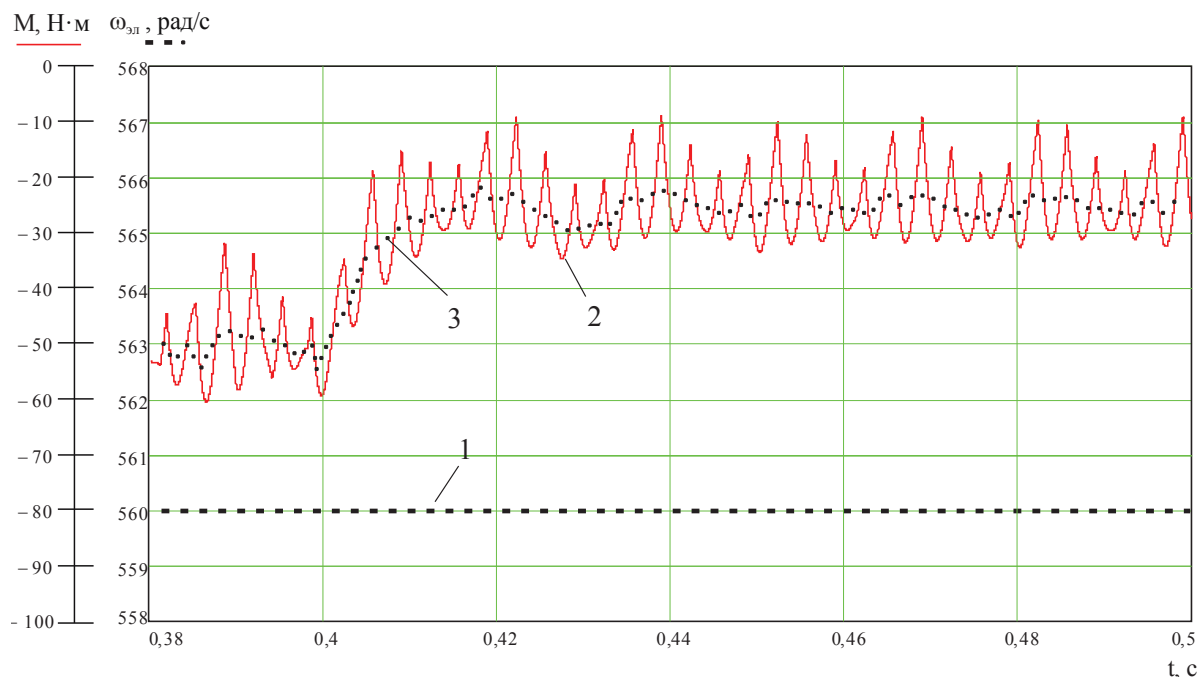


Рис. 8. Переходные процессы АВР при уменьшении сигнала задания момента и неизменной скорости

- 2) при понижении скорости в пределах рабочей области (рис. 7) перерегулирование составляет $\delta_{\%} \approx 40\%$, время регулирования $t_{\text{пр}} \approx 0,021$ с;
- 3) при уменьшении задания момента и неизменной скорости (рис. 8) перерегулирование отсутствует, время регулирования $t_{\text{пр}} \approx 0,02$ с.

Выводы

Инвариантность момента нагрузочной части стэнда с системой управления по предложенной структуре при изменении скорости (уменьшение или увеличение) в пределах рабочей области подтверждается результатами имитационного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков В.Я. Основные проблемы энергетики и возможные способы их решения // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 5–13.
2. Нагрузочное устройство: заявка МПК12 Н 02 Р 5/00, Н 04 R 29/00. Респ. Беларусь. № а20101749; заявл. 04.12.10; опубл. 30.08.12, Бюл. № 4. – 37 с.
3. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
4. Фираго Б.И., Палявич Л.Б. Теория электропривода. – Мн.: ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527 с.
5. Хватов С.В., Титов В.Г. Принципы построения электрических нагружающих устройств // Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 338–341.
6. Анхимюк В.Л., Опейко О.Ф., Михеев Н.Н. Теория автоматического управления. – Мн.: Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.
7. Захаренко В.С., Дорошенко И.В., Погуляев М.Н. Исследование гармонического состава потребляемого тока автоматизированного электромеханического испытательного стэнда на основе асинхронно-вентильного каскада // Вестник Гомельского гос. техн. универ-та им. П.О. Сухого. – 2009. – № 3. – С. 53–58.

Поступила 23.01.2013 г.